

Analisis Data Lendutan Perkerasan dengan Program *Backcalc* untuk Sistem Struktur 2-Lapisan

Djunaedi Kosasih¹⁾

Abstrak

Data lendutan masih umum digunakan dalam proses evaluasi kondisi struktur perkerasan, khususnya karena pengukuran lendutan dapat dilakukan secara non-destruktif. Lendutan maksimum (d_{max}) dan cekung lendutan yang terjadi akibat beban roda kendaraan secara teoritis dapat mencerminkan kondisi struktur perkerasan yang dinyatakan dengan modulus (E) dan konstanta poisson (μ). Makin besar nilai d_{max} yang terjadi, maka nilai E struktur perkerasan akan makin rendah, dan sebaliknya. Sedangkan, cekung lendutan akan menentukan distribusi nilai E untuk masing-masing lapisan perkerasan, dimana nilai E untuk lapisan yang lebih atas biasanya akan lebih besar dibandingkan dengan nilai E untuk lapisan dibawahnya. Pengaruh nilai μ terhadap hubungan antara nilai d_{max} dan nilai E umumnya dianggap tidak signifikan.

Back Calculation merupakan proses perhitungan balik untuk mendapatkan modulus perkerasan berdasarkan data lendutan dengan mempersamakan cekung lendutan teoritis terhadap cekung lendutan yang diukur di lapangan. Namun, dari literatur dan dari hasil analisis yang telah dilakukan, cekung lendutan teoritis ternyata sulit untuk dapat dibuat tepat sama dengan cekung lendutan survai kecuali di beberapa titik pada cekung lendutan yang sengaja dijadikan target dalam melakukan proses konvergensi.

Makalah ini mendiskusikan proses Back Calculation hanya untuk struktur perkerasan yang dimodelkan sebagai sistem struktur dua-lapisan dengan menggunakan program komputer BackCalc. Untuk sistem struktur dua-lapisan, konvergensi umumnya terjadi pada titik lendutan maksimum dan pada titik belok dari cekung lendutan. Disamping itu, lendutan maksimum diketahui lebih berkorelasi dengan modulus perkerasan, sedangkan lendutan titik belok lebih berkorelasi dengan modulus tanah dasar.

Kata-kata Kunci : lendutan maksimum, cekung lendutan, pemodelan struktur perkerasan, modulus perkerasan, back calculation, program BackCalc.

Abstract

Deflection is still used in pavement condition evaluation, particularly because it can be measured in a non-destructive way. Maximum deflection (d_{max}) and its respective deflection bowl caused by the wheel load theoretically reflect structural conditions of a pavement, expressed in terms of modulus (E) and poisson ratio (μ). The higher the value of d_{max} , the smaller the modulus will be. Meanwhile, deflection bowl dictates the distribution of the modulus for each pavement layer, where upper layers normally have higher modulus. The effect of poisson ratio on the relationship between deflection and pavement modulus is usually assumed to be insignificant.

Back calculation is a process whereby pavement modulus is to be back calculated from deflection data, in such a way, that the resulting theoretical deflection bowl is to be matched with the measured deflection bowl. However, from the literature and from the analysis carried out in this research, it was found that it would be quite difficult to obtain a perfect match between the two deflection bowls, except at few deflection points at which convergences were exercised.

This paper discusses back calculation for pavement structures modeled as a two-layered system by using computer program BackCalc. For two-layered systems, in general, convergences occurred at the maximum deflection point and at the inflection point of a deflection bowl. Whereas, maximum deflection was found to correlate better with pavement modulus, and deflection at the inflection point correlated better with subgrade modulus.

Keywords : maximum deflection, deflection bowl, pavement structure modeling, pavement modulus, back calculation, program BackCalc.

1) Staf Pengajar, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITB.

Catatan : Usulan makalah dikirimkan pada tanggal 7 Januari 2003 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 13 Januari 2003–5 Februari 2003. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 7 Februari 2003 hingga 15 Februari 2003.

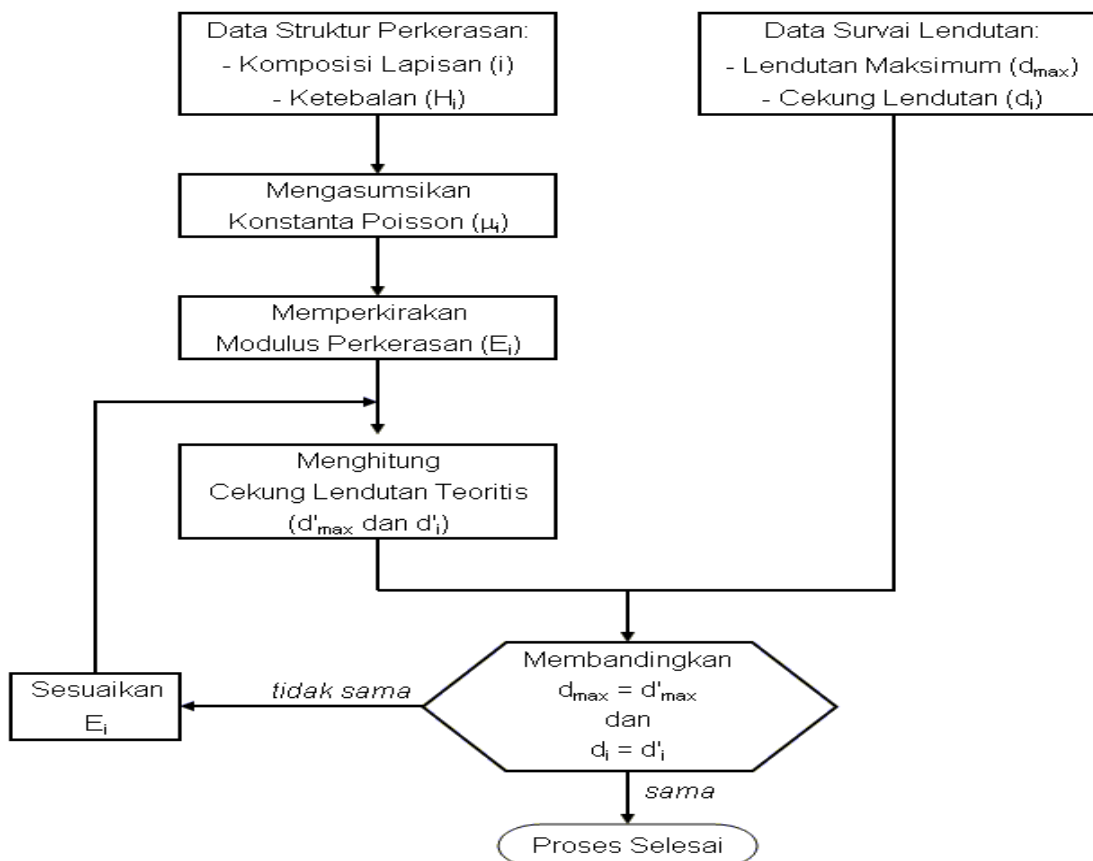
1. Pendahuluan

Modulus perkerasan diperlukan sebagai data dalam proses desain, baik dengan pendekatan analitis^[1], maupun dengan pendekatan empiris^[2]. Untuk keperluan desain, data modulus perkerasan dapat diperoleh dari pengujian laboratorium terhadap bahan perkerasan yang digunakan.

Dalam proses evaluasi kondisi struktur perkerasan dan proses desain lapisan tambahan, data modulus perkerasan dari struktur perkerasan yang ada dapat dihitung dari data lendutan melalui proses *Back Calculation*^[3,10]. Lendutan yang terjadi pada struktur perkerasan akibat beban roda kendaraan secara teoritis ditentukan oleh komposisi dan tebal lapisan perkerasan, karakteristik bahan perkerasan (modulus dan konstanta poisson), konfigurasi dan beban roda kendaraan, dan kondisi struktur perkerasan pada saat pengukuran. *Back Calculation* merupakan proses perhitungan balik untuk memperoleh modulus perkerasan berdasarkan data lendutan dengan mempersamakan cekung lendutan teoritis terhadap cekung lendutan survai, seperti diilustrasikan pada Gambar 1.

Proses *Back Calculation* secara teoritis tidaklah terlalu sulit. Akan tetapi, secara praktis, karena banyak faktor yang dapat mempengaruhi lendutan perkerasan, modulus perkerasan yang dihasilkan dari proses *Back Calculation* umumnya tidak unik. Sebagai contoh, dari hasil analisis yang telah dilakukan, cekung lendutan teoritis cukup sulit untuk dapat dibuat tepat sama dengan cekung lendutan survai kecuali di beberapa titik pada cekung lendutan yang sengaja dijadikan target dalam melakukan proses konvergensi.

Keterbatasan dan potensi kemanfaatan dari proses *Back Calculation* telah didiskusikan secara rinci oleh Irwin^[4] dan Thomson^[5]. Sebagian keterbatasan yang terungkap termasuk ketidak-akuratan data tebal perkerasan, konstanta poisson yang harus diasumsikan, kriteria konvergensi, ukuran ketepatan dari modulus perkerasan yang dihasilkan, data lendutan yang sifatnya diskrit baik dalam waktu maupun ruang, dan tidak dipertimbangkannya gradasi modulus tanah dasar dalam arah vertikal akibat perbedaan kadar air, juga gradasi modulus perkerasan (lapisan beraspal) dalam arah vertikal akibat variasi temperatur, atau ketergantungan modulus lapisan agregat dan tanah dasar pada tegangan yang terjadi. Sedangkan, salah



Gambar 1. Proses *back calculation*

satu potensi pemanfaatan praktis dari proses *Back Calculation* juga ditemukan dalam AASHTO (1993)^[2] untuk mengevaluasi variasi karakteristik lapisan perkerasan yang terjadi dalam setahun, sebagai berikut: *"An alternative procedure for determining the seasonal variation of the modulus is to back calculate the resilient modulus for different seasons using deflections measured on in-service pavements. These may be used as adjustment factors to correct the resilient modulus for a reference condition"*

Tujuan penulisan dari makalah ini secara khusus adalah untuk menganalisis pengaruh dari asumsi konstanta poisson yang digunakan, kriteria untuk proses konvergensi, dan pemodelan struktur perkerasan ke dalam sistem struktur dua-lapisan, terhadap modulus perkerasan.

2. Data Struktur Perkerasan

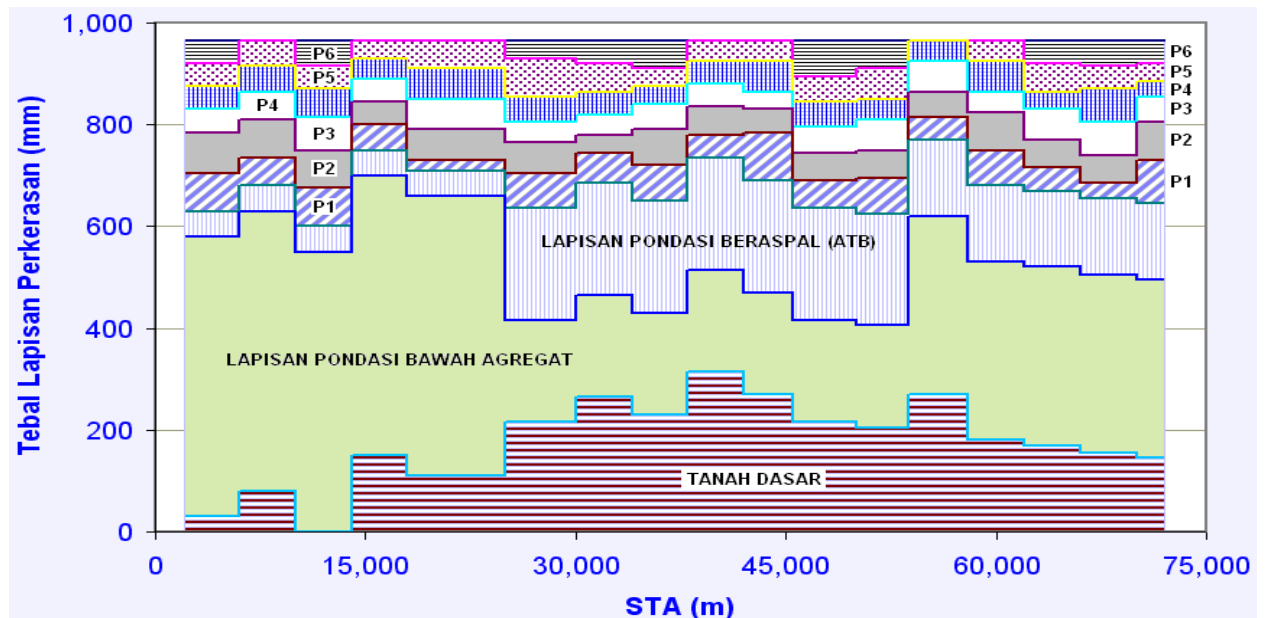
Data struktur perkerasan yang dianalisis adalah data struktur perkerasan dari jalan tol Jakarta-Cikampek hasil uji coring tahun 1999 pada lajur lambat di jalur A (arah Cikampek) sepanjang ± 70 km, seperti diperlihatkan pada Gambar 2^[11,12].

Secara umum, jalan tol ini telah menerima beberapa kali kegiatan pelapisan tambahan (yaitu lapisan P2 ÷ P6). Tebal masing-masing lapisan perkerasan di sepanjang jalan tol ternyata cukup bervariasi. Variasi

tebal struktur perkerasan sebenarnya dapat terjadi karena perbedaan perkiraan beban lalu lintas pada saat desain atau terjadi semata-mata karena toleransi pelaksanaan konstruksi. Kemungkinan alasan lain adalah karena tingkat kerusakan struktur perkerasan yang berbeda. Sebagai contoh, dua kegiatan pelapisan tambahan terakhir terlihat tidak diberikan secara menyeluruh untuk semua ruas jalan. Bahkan ruas jalan pada STA sekitar 55+000 tidak menerima kedua kegiatan pelapisan tambahan terakhir tersebut.

Profil struktur perkerasan yang teliti sangat diperlukan untuk dapat melakukan analisis data lendutan secara tepat. Oleh karena itu, peralatan survei yang mampu mengukur tebal setiap lapisan perkerasan secara menerus dan non-destruktif, seperti misalnya Ground Penetrating Radar (GPR), perlu dipertimbangkan.

Idealnya, model struktur perkerasan yang dianalisis harus disesuaikan dengan jumlah lapisan perkerasan yang dijumpai di lapangan. Oleh karena itu, jalan tol Jakarta-Cikampek (lihat Gambar 2) seharusnya dimodelkan sebagai sistem struktur 7-lapisan sampai 9-lapisan. Namun, dalam uraian berikut, struktur perkerasan ini hanya akan dimodelkan sebagai sistem struktur dua-lapisan saja. Meskipun kurang teliti, model sistem struktur dua-lapisan masih sering digunakan dalam praktek mengingat faktor kemudahan dalam proses perhitungan, dan khususnya untuk mengevaluasi kondisi tanah dasar akibat pengaruh musim.



Gambar 2. Profil struktur perkerasan di sepanjang jalan tol Jakarta-Cikampek

Tabel 1. Contoh 4 model sistem struktur dua-lapisan alternatif pada STA 2+050

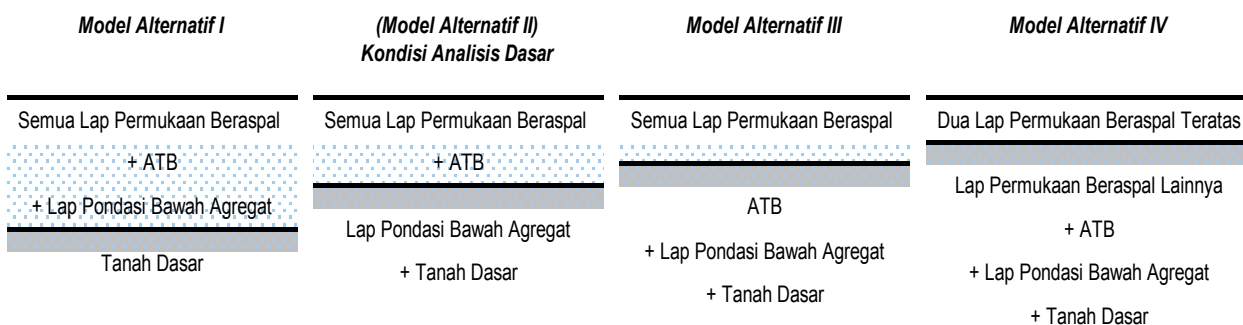
STA (m)	Lapis	As Built		Coring		Tebal Lapisan, H (mm) untuk:			
		Bahan	H (mm)	Bahan	H (mm)	Alt.1	Alt.2	Alt.3	Alt.4
2050		Jun-86		Mar-99					
	P6			AC	45	935	385	335	90
	P5			AC	45				
	P4			AC	45				AC
	P3			AC	45				
	P2			AC	80				
	P1	AC	50	AC	75				
	B	ATB	50					ATB	
	SB	AGGB	550				SB		
	SG	SN	500			SG			
	Total		1150		335	935	385	335	90

Pemodelan struktur perkerasan ke dalam sistem struktur dua-lapisan dapat menghasilkan banyak model alternatif. Tabel 1 memperlihatkan contoh empat usulan model alternatif untuk struktur perkerasan pada STA 2+050, sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 3. Model alternatif pertama menggabungkan semua lapisan beraspal dan lapisan agregat sebagai lapisan perkerasan di atas tanah dasar; model alternatif kedua menggabungkan semua lapisan beraspal di atas gabungan antara lapisan pondasi bawah agregat dan tanah dasar; model alternatif ketiga menggabungkan semua lapisan permukaan aspal beton (AC) di atas lapisan pondasi beraspal (ATB) dan lapisan-lapisan lain dibawahnya; dan model alternatif keempat hanya memisahkan dua lapisan permukaan aspal beton teratas sebagai lapisan pertama, sedangkan lapisan permukaan aspal beton lainnya dan lapisan-lapisan dibawahnya sebagai lapisan kedua.

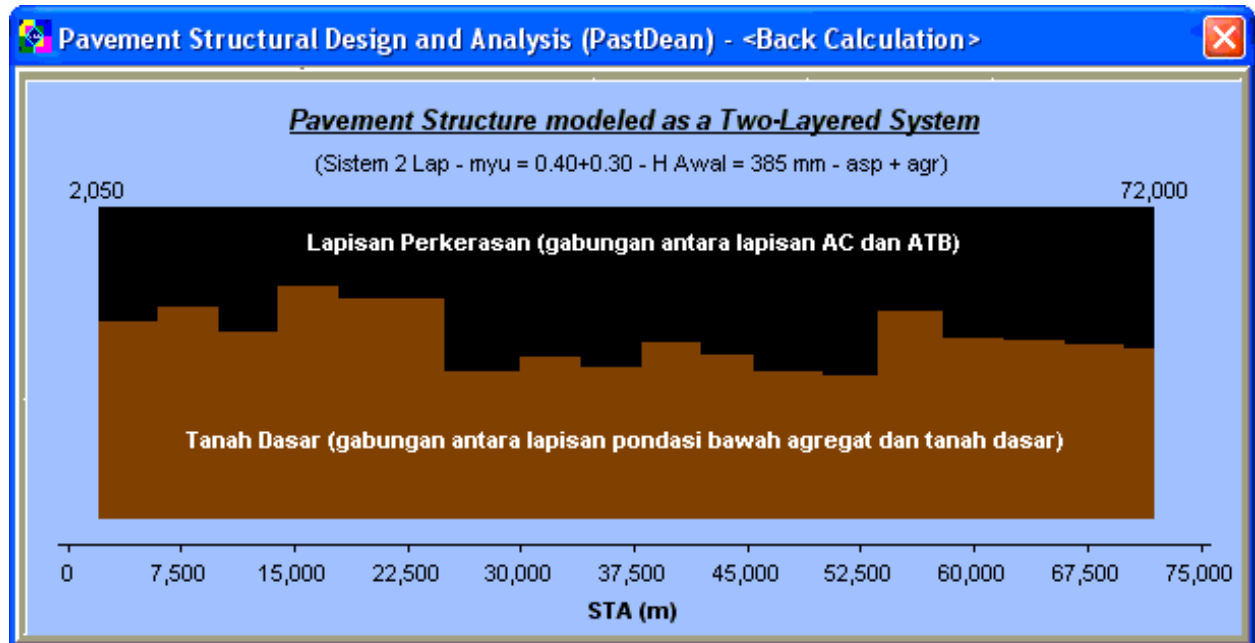
Dari empat model alternatif ini, model alternatif kedua mungkin dapat dianggap sebagai model sistem struktur

dua-lapisan yang paling rasional karena adanya kesamaan karakteristik antara lapisan-lapisan perkerasan yang digabungkan [13]. Di sini mungkin muncul pertanyaan apakah ketebalan lapisan yang memiliki karakteristik bahan yang berbeda perlu dikoreksi, misalnya dengan menggunakan koefisien kekuatan lapisan relatif (a) seperti halnya dalam pendekatan empiris. Secara teoritis, koreksi yang dimaksud seharusnya dilakukan dengan menambah jumlah lapisan, bukan dengan mengubah tebal lapisan karena akan mempengaruhi tegangan-regangan-lendutan di dalam struktur perkerasan. Meskipun demikian, pemanfaatan nilai- a untuk penyederhanaan proses *Back Calculation* telah didiskusikan oleh Rada, et.al.[6], Hossain, et.al.[7] dan Jung, et.al.[8].

Kriteria penetapan model struktur perkerasan terbaik masih akan didiskusikan sebagai salah satu materi analisis pada uraian selanjutnya. Gambar 4 memperlihatkan hasil pemodelan sistem struktur dua-lapisan sepanjang jalan tol Jakarta-Cikampek.



Gambar 3. Ilustrasi empat model sistem struktur dua-lapisan alternatif



Gambar 4. Model sistem struktur dua-lapisan yang dianggap rasional (alternatif kedua)

Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, Tabel 1 juga secara lebih jelas memperlihatkan variasi tebal masing-masing lapisan perkerasan antara data as-built tahun 1986 dan data hasil uji coring tahun 1999. Untuk analisis selanjutnya, pemodelan struktur perkerasan didasarkan pada kombinasi dari data as-built dan data hasil uji coring ini; dan perlu juga kiranya dicatat di sini, bahwa untuk pemodelan sistem struktur berlapis, lapisan terbawah selalu dianggap memiliki ketebalan yang tak terhingga.

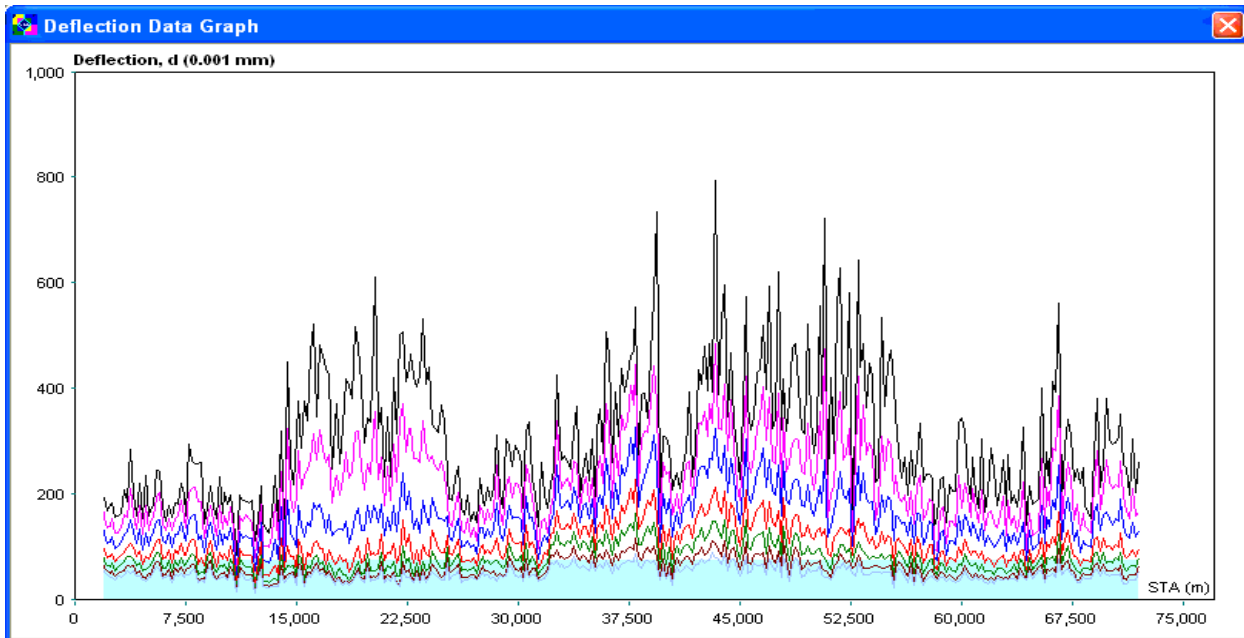
Untuk keperluan perhitungan cekung lendutan teoritis, konstanta poisson (μ) dari setiap lapisan perkerasan yang telah dimodelkan di atas harus diketahui. Nilai μ pada dasarnya ditentukan oleh karakteristik bahan perkerasan melalui uji laboratorium. Nilai μ yang umum digunakan untuk tanah dasar, lapisan agregat dan lapisan beraspal berturut-turut adalah 0.4, 0.3 dan 0.4. Pengaruh dari nilai μ dalam proses *Back Calculation* akan dianalisis pada uraian selanjutnya.

3. Data Lendutan

Seperti halnya data struktur perkerasan, data lendutan yang dianalisis adalah juga data lendutan dari jalan tol Jakarta-Cikampek hasil survai tahun 1999 pada lajur lambat di jalur A (arah Cikampek) untuk jarak pengukuran setiap 200 m sepanjang ± 70 km, seperti diperlihatkan pada Gambar 5[11,12]. Jumlah total data

lendutan yang dianalisis untuk makalah ini adalah sebanyak 349 buah. Data lendutan ini diukur dengan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer (FWD)* pada 7 titik bacaan yang membentuk cekung lendutan termasuk lendutan maksimum. Ketujuh titik bacaan ditetapkan masing-masing pada jarak 0, 300, 600, 750, 900, 1200 dan 1500 mm dari pusat beban. Gambar 6 memperlihatkan satu contoh data cekung lendutan pada STA 2+050. Beban yang bekerja adalah sekitar 50 kN dengan diameter bidang kontak sebesar 300 mm. Data pendukung yang turut dicatat pada saat survai lendutan adalah data suhu udara dan suhu permukaan perkerasan, musim, dan kondisi perkerasan di sekitar titik pengukuran.

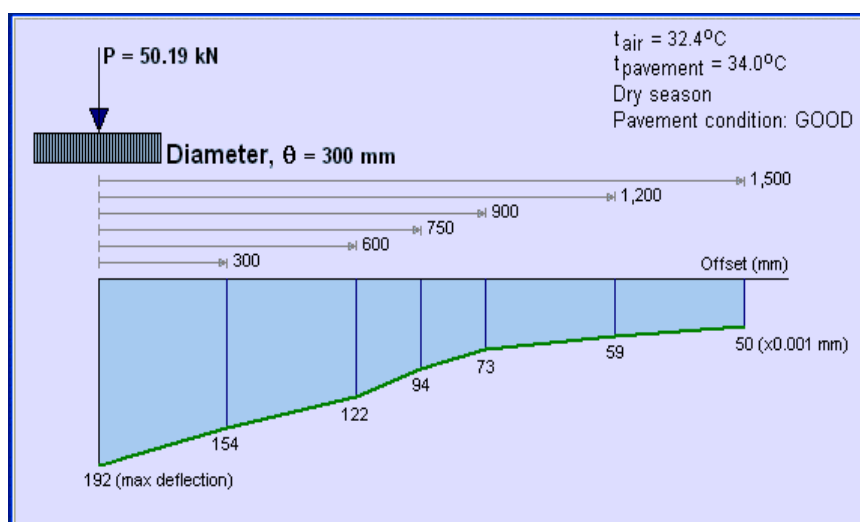
Dari Gambar 5 terlihat bahwa lendutan maksimum (d_{max}) sangat fluktuatif dengan rentang antara $84 \div 794$ micron. Demikian juga dengan lendutan pada titik bacaan sejauh 1500 mm dari pusat beban (d_{1500}) yang meskipun terlihat lebih seragam ternyata memiliki rentang data yang cukup lebar, yaitu antara $12 \div 88$ micron. Variasi data lendutan ini dapat disebabkan oleh 2 faktor utama, yaitu: ketidakseragaman kondisi struktur perkerasan di sepanjang jalan tol yang sedang dianalisis atau perbedaan suhu perkerasan selama periode survai. Oleh karena itu, bersamaan dengan survai lendutan, data kerusakan struktur perkerasan dan suhu perkerasan harus turut dicatat.



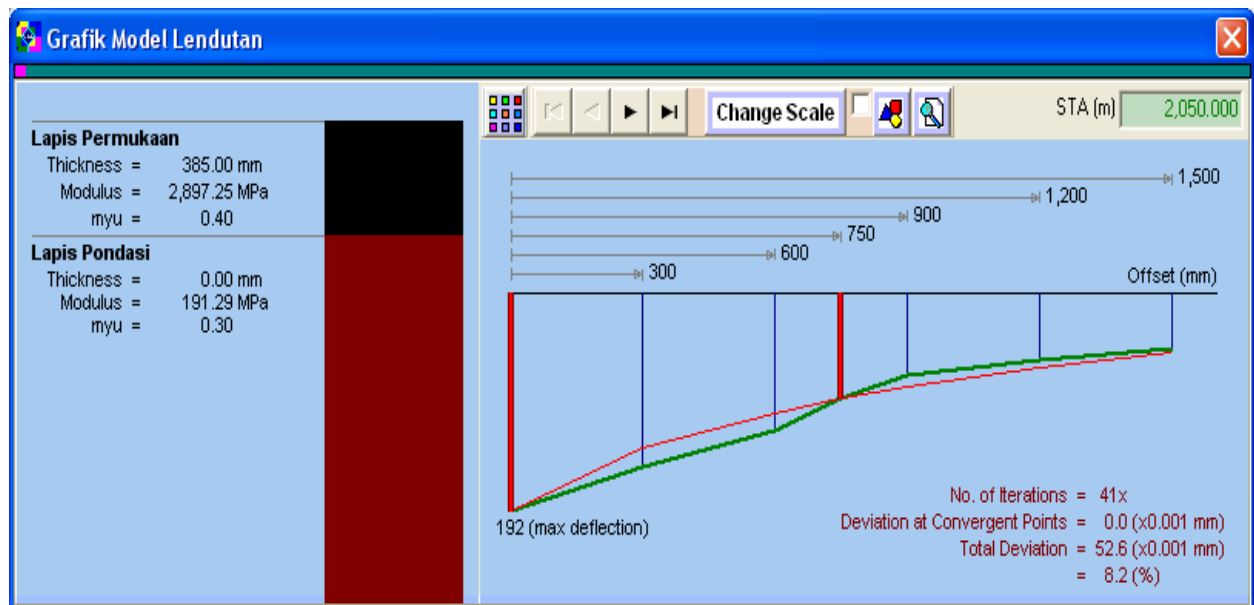
Gambar 5. Data lendutan pada tujuh titik bacaan yang membentuk cekung lendutan

Dengan proses *Back Calculation*, ketidakseragaman kondisi struktur perkerasan dapat tergambarkan melalui variasi modulus perkerasan yang dihasilkan. Sedangkan, jika suhu perkerasan juga diketahui bervariasi selama periode survai, maka koreksi terhadap modulus perkerasan yang dihasilkan harus dilakukan. Koreksi ini tidak dilakukan pada saat proses *Back Calculation* melainkan pada saat modulus perkerasan yang dihasilkan akan digunakan untuk keperluan analisis lanjutan, seperti misalnya untuk penentuan kekuatan sisa struktur perkerasan atau untuk perhitungan desain lapisan tambahan.

Untuk sistem struktur dua-lapisan, proses *Back Calculation* hanya menghitung dua variabel bebas, yaitu modulus dari kedua lapisan perkerasan yang dimodelkan. Secara matematis, hanya dua kondisi batas yang diperlukan dalam proses konvergensi. Umumnya, dua titik konvergen pada cekung lendutan survai yang digunakan harus termasuk d_{max} , sehingga ada 6 kemungkinan target cekung lendutan yang dapat dipilih, yaitu d_{max} dan salah satu dari d_{300} , d_{600} , d_{750} , d_{900} , d_{1200} sampai d_{1500} . Dalam analisis selanjutnya akan didiskusikan pengaruh dari target cekung lendutan terhadap modulus perkerasan yang



Gambar 6. Contoh data cekung lendutan pada STA 2+050

Gambar 7. Contoh hasil keluaran utama program *BackCalc*

4. Metoda Analisis

4.1 Program *BackCalc*

Analisis data lendutan untuk makalah ini telah dilakukan dengan menggunakan program *BackCalc*. Program *BackCalc* dikembangkan di Laboratorium Rekayasa Jalan, ITB, berdasarkan program DAMA dari *The Asphalt Institute* (1983)^[1], sebagai salah satu kegiatan dalam rangka penelitian RUT (Riset Unggulan Terpadu) ke-IX yang disponsori oleh Kementerian Riset dan Teknologi pada tahun 2002/03^[14]. Program ini dapat dioperasikan pada sistem operasi Window. Selain sebagai alat hitung biasa (proses interaktif), program ini juga dirancang sebagai program aplikasi database yang dapat melakukan analisis kondisi struktur perkerasan secara time-series

Secara umum, program *BackCalc* dimaksudkan untuk menghitung modulus perkerasan dari berbagai model struktur perkerasan dan target cekung lendutan dengan hasil utama seperti contoh pada Gambar 7. Pada gambar sebelah kiri diperlihatkan model struktur perkerasan (bandingkan dengan data pada Tabel 1) dengan nilai modulus yang dihasilkan; dan pada gambar sebelah kanan diperlihatkan kedua cekung lendutan survai (bandingkan dengan data pada Gambar 6) dan cekung lendutan teoritis, beserta tanda untuk titik-titik konvergen dan juga besarnya deviasi dari cekung lendutan teoritis baik deviasi total maupun deviasi pada titik-titik konvergen saja. Juga ditampilkan jumlah iterasi yang diperlukan sampai tercapainya kondisi konvergen.

Deviasi lendutan total adalah jumlah absolut dari deviasi yang terjadi pada ketujuh titik data lendutan. Sedangkan, nilai %-deviasi lendutan total dihitung sebagai persen perbandingan antara luas simpangan terhadap luas cekung lendutan survai. Deviasi lendutan total yang dinyatakan dalam (%) secara relatif seharusnya lebih berarti untuk menyatakan besaran simpangan dari cekung lendutan teoritis terhadap cekung lendutan survai.

Jumlah lapisan perkerasan yang dapat dimodelkan untuk analisis data lendutan dengan menggunakan program *BackCalc* adalah maksimum 4 lapisan, dimana komposisi dari setiap lapisan perkerasan dapat ditentukan secara komparatif sesuai dengan yang ada di lapangan. Misalnya, lapisan pondasi bawah agregat dapat dimodelkan sebagai lapisan tersendiri atau sebagai bagian dari gabungan antara lapisan pondasi agregat dan lapisan pondasi bawah agregat, dan seterusnya.

Titik-titik konvergen dapat ditentukan dari tujuh titik bacaan pada cekung lendutan secara interaktif. Namun, program *BackCalc* juga menyediakan pilihan untuk dapat melakukan proses konvergensi yang menghasilkan deviasi lendutan total antara cekung lendutan survai dan cekung lendutan teoritis yang paling kecil (*Best Fit*); dan dalam hal ini, hanya lendutan maksimum saja yang tetap dibuat konvergen. Sebagai konsekwensi dari pilihan *Best Fit* adalah waktu operasi komputer yang rata-rata lebih lama sekitar 75%.

Khusus untuk pemodelan struktur perkerasan ke dalam sistem 3-lapisan atau lebih, Modular Ratio antara dua lapisan yang berurutan yang dihasilkan dari proses *Back Calculation* dapat kurang dari 1.0. Jika tidak ada alasan yang jelas, maka hasil analisis ini seharusnya tidak logis. Untuk menghindari anomali ini, program *BackCalc* menyediakan pilihan agar Modular Ratio selalu lebih besar dari 1.0.

Fasilitas penting lainnya yang disediakan dalam program *BackCalc* adalah pilihan untuk tingkat akurasi dari proses *Back Calculation*. Pilihan tingkat akurasi akan menentukan jumlah iterasi yang dilakukan. Untuk keperluan praktis, tingkat akurasi standar secara umum sudah mencukupi. Sebagai contoh, untuk sistem struktur dua-lapisan, tingkat akurasi standar memerlukan proses iterasi rata-rata sebanyak 32x dengan waktu pemrosesan selama sekitar 17 detik untuk setiap data lendutan yang dianalisis pada komputer Pentium-4. Sedangkan, tingkat akurasi tinggi memerlukan iterasi rata-rata sebanyak 41x selama sekitar 22 detik.

4.2 Kondisi analisis dasar

Empat kondisi analisis dasar berikut perlu ditetapkan untuk memperoleh hasil awal yang akan dijadikan sebagai acuan (*base case*) dalam analisis-analisis selanjutnya.

- 1) Model alternatif kedua (lihat Tabel 1) dipilih sebagai model sistem struktur dua-lapisan acuan.
- 2) Konstanta poisson untuk gabungan lapisan beraspal adalah 0.4 dan untuk gabungan antara lapisan pondasi bawah agregat dan tanah dasar

adalah 0.3.

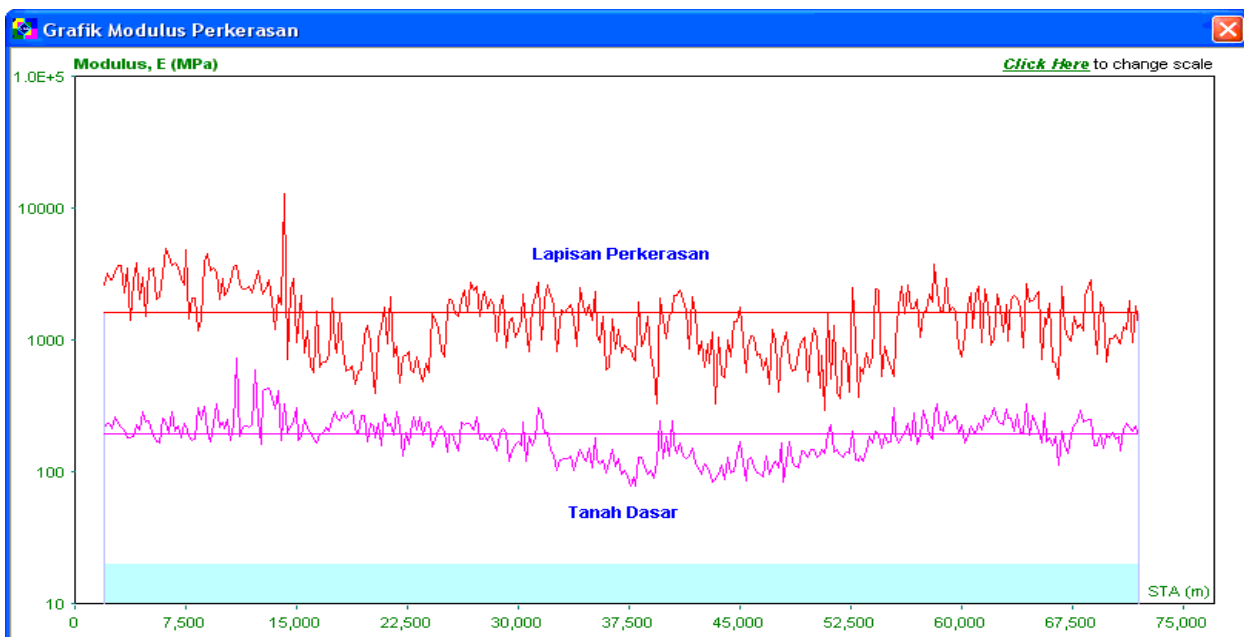
- 3) Titik-titik konvergen acuan ditetapkan secara dinamik untuk memperoleh deviasi lendutan total terkecil antara cekung lendutan teoritis dan cekung lendutan survai.
- 4) Analisis dilakukan dengan pilihan tingkat akurasi tinggi.

5. Hasil Analisis

5.1 Hasil keluaran program *BackCalc* untuk kondisi analisis dasar

Gambar 8 memperlihatkan modulus lapisan perkerasan dan modulus tanah dasar yang dihasilkan untuk kondisi analisis dasar. Untuk sistem struktur dua-lapisan, modulus lapisan perkerasan ternyata selalu lebih besar dari pada modulus tanah dasar (Modular Ratio > 1.0). Seperti halnya data lendutan yang telah digunakan dalam analisis (lihat Gambar 5), modulus lapisan perkerasan juga bervariasi dengan rentang antara $290.06 \div 12610.32$ MPa, sedangkan modulus tanah dasar antara $76.98 \div 721.41$ MPa.

Seperti yang diharapkan, grafik modulus perkerasan pada Gambar 8 memperlihatkan hubungan yang terbalik dengan grafik data lendutan pada Gambar 5. Lendutan yang besar menghasilkan modulus perkerasan yang kecil; dan sebaliknya, lendutan yang kecil menghasilkan modulus perkerasan yang besar. Hasil analisis lebih lanjut terhadap hubungan tersebut diperlihatkan pada Gambar 9, dimana untuk struktur perkerasan yang sedang dianalisis modulus lapisan perkerasan lebih berkorelasi secara logaritmis dengan data lendutan maksimum (d_{max}). Sedangkan, modulus



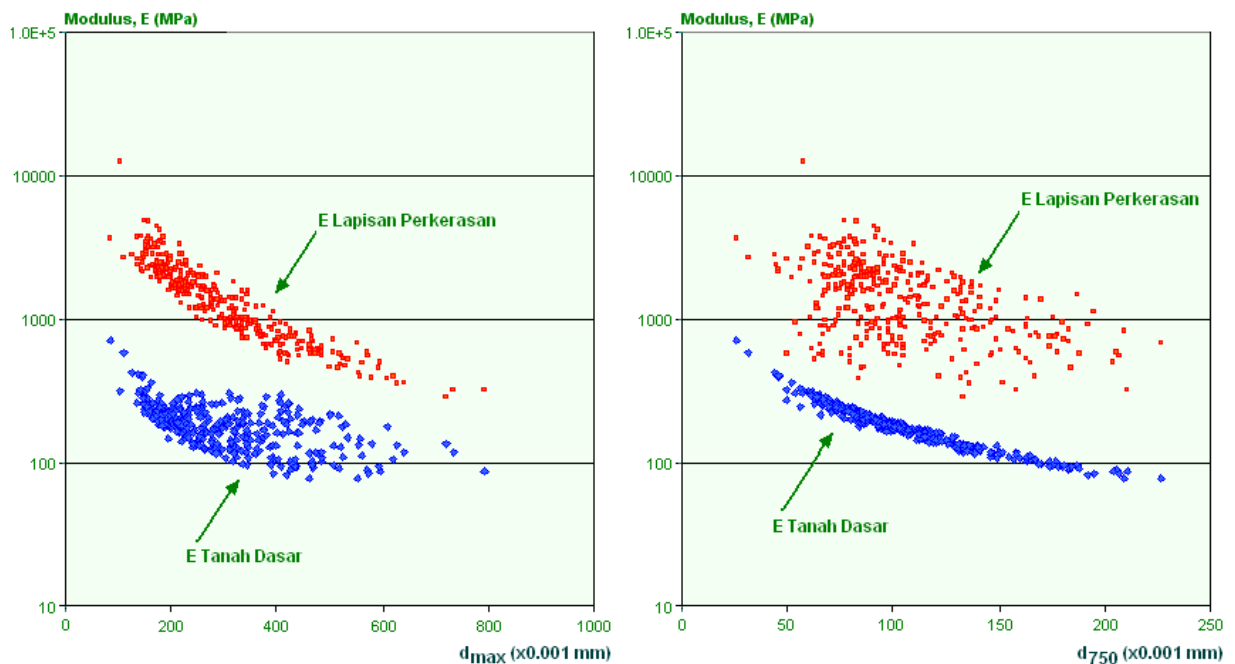
Gambar 8. Hasil perhitungan modulus perkerasan untuk sistem struktur 2-lapisan

Mengamati data cekung lendutan, seperti contoh pada Gambar 7 terlihat, bahwa untuk struktur perkerasan yang sedang dianalisis, lendutan d_{750} umumnya terletak pada titik belok dari cekung lendutan. Hal ini menyatakan bahwa lendutan titik belok, selain lendutan maksimum, merupakan dua parameter penting dari data lendutan. Arti penting dari kedua parameter tersebut juga terlihat dari pemanfaatannya dalam metoda desain lapisan tambahan^[15] yang masih berlaku di Indonesia.

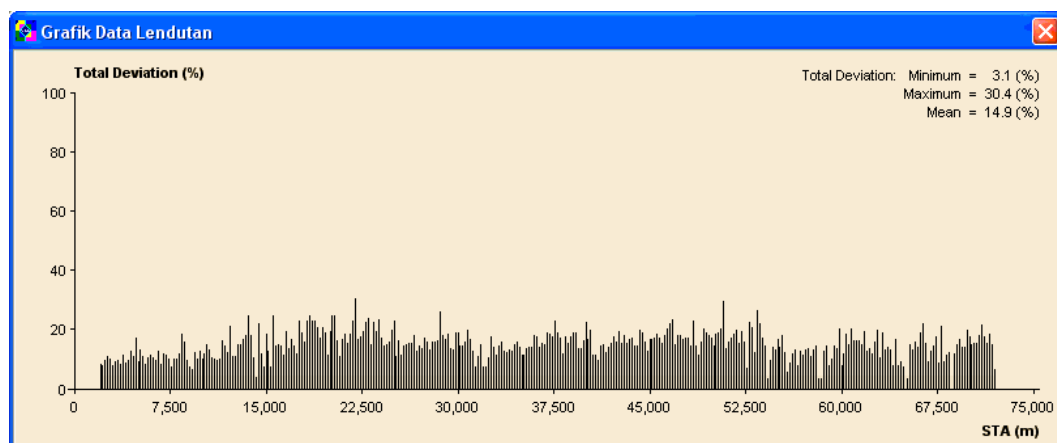
Akan tetapi, perlu dicatat bahwa lendutan titik belok tidak selalu terletak sejauh 750 mm dari pusat beban. Komposisi dan kualitas setiap lapisan perkerasan mempengaruhi posisi dari lendutan titik belok. Struktur perkerasan dengan lapisan permukaan yang lebih kaku dan lebih tebal umumnya memberikan lendutan titik belok yang lebih jauh dari pusat beban.

Hubungan antara modulus perkerasan dan lendutan mungkin unik untuk setiap struktur perkerasan yang dianalisis. Persamaan regresi yang dihasilkan mungkin juga berubah jika struktur perkerasan telah menerima kegiatan lapisan tambahan atau rekonstruksi. Salah satu manfaat utama dari persamaan regresi tersebut adalah untuk dapat memperkirakan harga awal dari modulus perkerasan, sehingga proses iterasi diharapkan dapat dilakukan dengan lebih cepat.

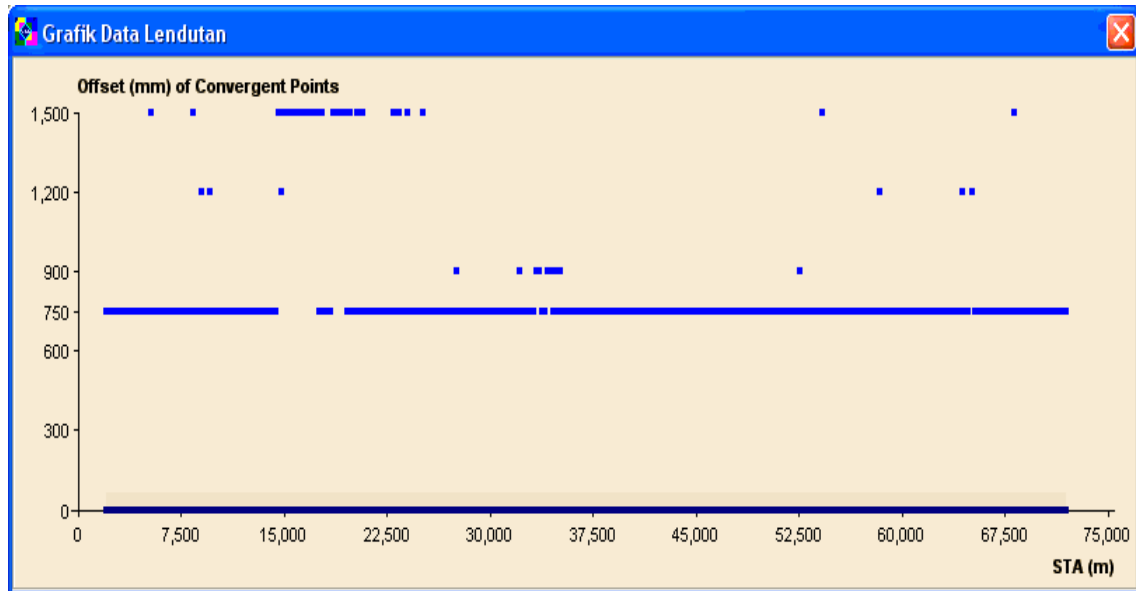
Seperti diperlihatkan pada Gambar 10, model sistem struktur dua-lapisan untuk jalan tol Jakarta-Cikampek memberikan deviasi lendutan total rata-rata sebesar 14.9%. Mengacu pada studi yang dilakukan oleh Rada, et.al.^[9], deviasi lendutan total ini mungkin masih relatif besar. Deviasi lendutan total untuk sistem struktur tiga-lapisan dan empat-lapisan yang dianggap baik adalah tidak lebih dari 9.0%.



Gambar 9. Hubungan antara modulus perkerasan dan lendutan utk sistem struktur 2-lapisan

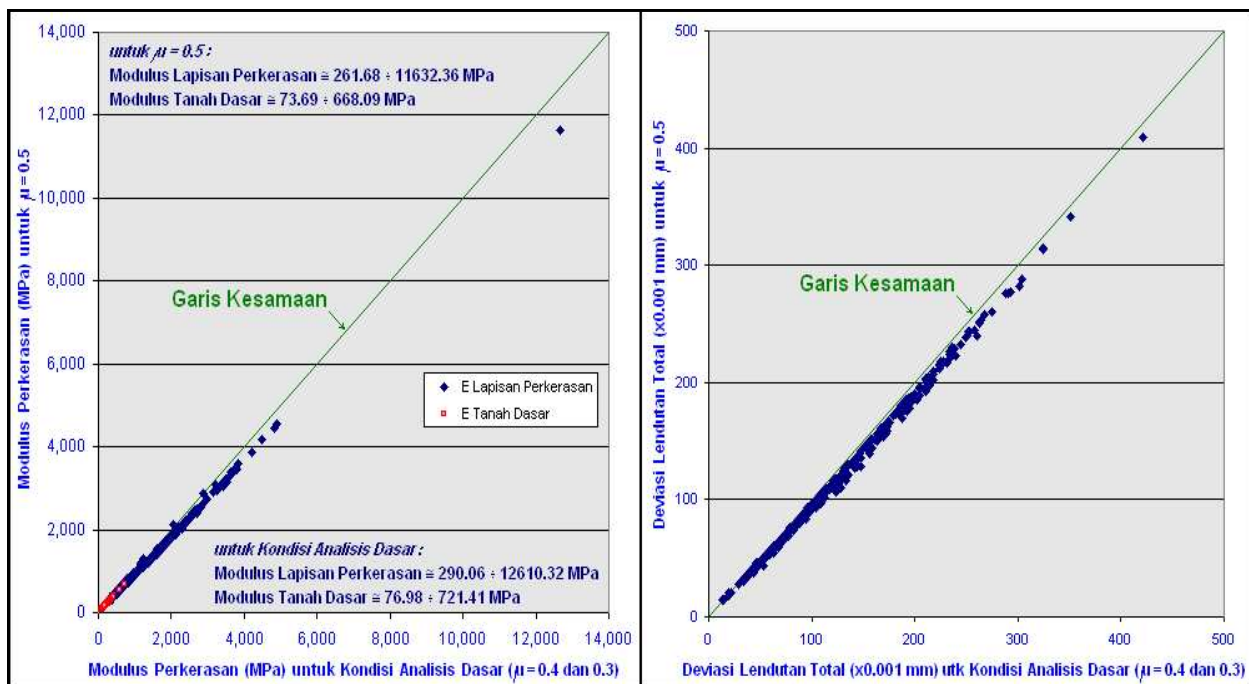


Gambar 10. Deviasi lendutan total yang dihasilkan untuk sistem struktur 2-lapisan



Gambar 11. Posisi dari lendutan konvergen yg menghasilkan deviasi lendutan total terkecil

Pada kondisi analisis dasar, seperti telah diungkapkan sebelumnya, proses *Back Calculation* dilakukan untuk mencari modulus perkerasan yang memberikan deviasi lendutan total paling kecil. Gambar 11 memperlihatkan, bahwa lendutan konvergen yang menghasilkan deviasi lendutan total terkecil umumnya terjadi pada lendutan d_{750} (selain d_{max} yang dalam program *BackCalc* selalu dibuat konvergen). Hanya untuk beberapa data saja, lendutan konvergen terjadi pada lendutan d_{900} , d_{1200} atau d_{1500} . Hal ini tentunya konsistensi dengan kenyataan bahwa lendutan d_{750} umumnya merupakan lendutan titik belok untuk struktur perkerasan di jalan tol yang sedang dianalisis.



Gambar 12. Hasil analisis program *BackCalc* untuk dua nilai μ yang berbeda

5.2 Pengaruh dari konstanta Poisson terhadap modulus perkerasan

Pengaruh dari konstanta poisson (μ) terhadap modulus perkerasan yang dihasilkan melalui proses *Back Calculation* diperlihatkan pada Gambar 12. Adapun nilai μ yang digunakan dalam analisis adalah sebagai berikut:

Kondisi Analisis Dasar:

Lapisan Perkerasan,	$\mu = 0.4$
Tanah Dasar,	$\mu = 0.3$

Nilai μ yang dianalisis:

Lapisan Perkerasan,	$\mu = 0.5$
Tanah Dasar,	$\mu = 0.5$

Untuk sistem struktur dua-lapisan, nilai μ yang lebih besar menghasilkan modulus perkerasan yang sedikit lebih kecil (berkurang sekitar 4% ÷ 10%). Dari Gambar 12 juga dapat dilihat, bahwa deviasi lendutan total hanya sedikit berkurang untuk nilai μ yang lebih besar. Jadi, secara umum, pengaruh nilai μ terhadap proses *Back Calculation* tidak signifikan.

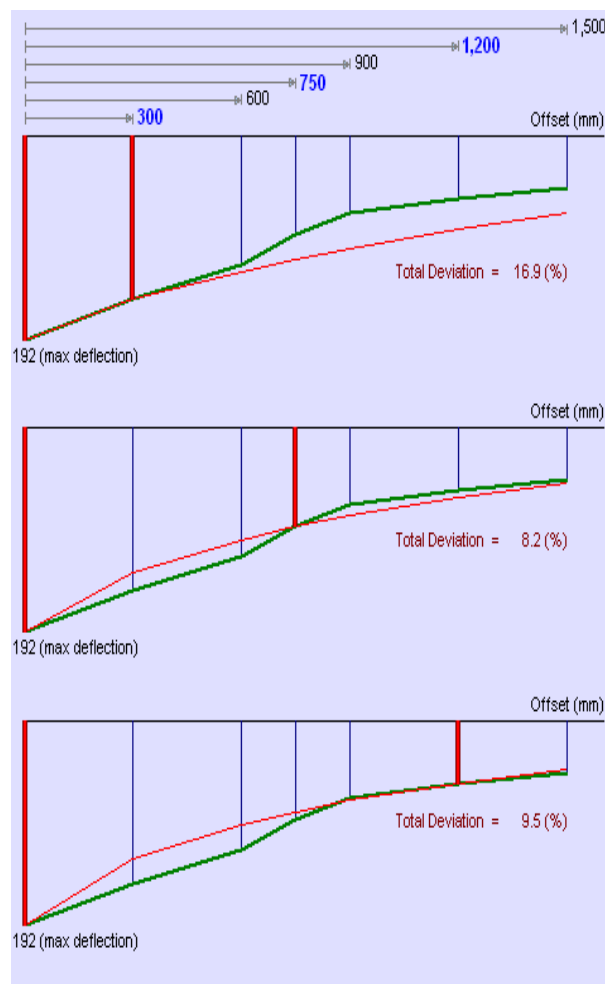
Dalam proses *Back Calculation*, nilai μ sebenarnya dapat dijadikan sebagai variabel bebas. Akan tetapi, selain memperpanjang proses iterasi, nilai μ ternyata tidak dapat membuat cekung lendutan teoritis tepat sama dengan cekung lendutan survai (atau deviasi lendutan total = 0). Hasil ini mempertegas asumsi dalam analisis struktur perkerasan, bahwa nilai μ biasanya ditetapkan sebagai konstanta yang hanya tergantung pada jenis dan karakteristik bahan perkerasan.

5.3 Pengaruh dari target cekung lendutan terhadap modulus perkerasan

Untuk kondisi analisis dasar, proses konvergensi tidak dilakukan terhadap target cekung lendutan tertentu, tetapi dilakukan secara dinamik sampai deviasi lendutan total antara cekung lendutan teoritis dan cekung lendutan survai menjadi minimum. Meskipun demikian, lendutan maksimum dalam program *Back-Calc* selalu dibuat konvergen. Dalam analisis berikut, hasil dari kondisi analisis dasar akan dibandingkan dengan hasil analisis yang dilakukan terhadap target cekung lendutan tertentu.

- 1) Target cekung lendutan d_{\max} dan d_{300} , dimana lendutan d_{300} untuk struktur perkerasan yang sedang dianalisis umumnya berada sebelum lendutan titik belok.
- 2) Target cekung lendutan d_{\max} dan d_{750} , dimana lendutan d_{750} untuk struktur perkerasan yang sedang dianalisis umumnya berada di sekitar lendutan titik belok.
- 3) Target cekung lendutan d_{\max} dan d_{1200} , dimana lendutan d_{1200} untuk struktur perkerasan yang sedang dianalisis umumnya berada setelah lendutan titik belok.

Tiga dari kemungkinan enam target cekung lendutan yang akan dianalisis di sini adalah sebagai berikut



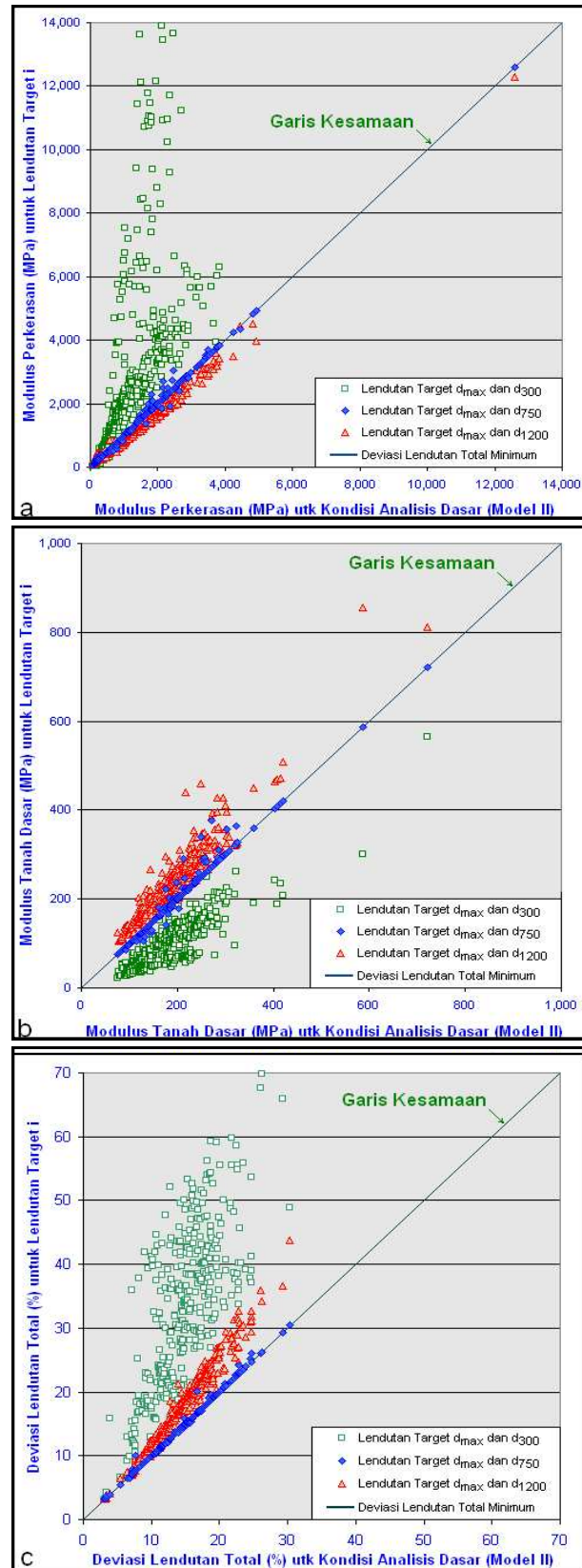
Pengaruh dari target cekung lendutan terhadap modulus perkerasan yang dihasilkan melalui proses *Back Calculation* diperlihatkan pada Gambar 13.

Untuk target cekung lendutan d_{\max} dan d_{300} , modulus tanah dasar (dengan rentang antara 21.15 ÷ 564.40 MPa) cenderung lebih kecil dibandingkan dengan modulus tanah dasar yang dihasilkan untuk kondisi analisis dasar (76.98 ÷ 721.41 MPa). Sedangkan, modulus lapisan perkerasan (391.75 ÷ 195,523.02 MPa) yang dihasilkan untuk target cekung lendutan d_{\max} dan d_{300} ini cenderung jauh lebih besar dan cenderung tidak realistis dibandingkan dengan yang untuk kondisi analisis dasar (290.06 ÷ 12,610.32 MPa).

Untuk target cekung lendutan d_{\max} dan d_{750} , baik modulus tanah dasar (76.85 ÷ 720.59 MPa) maupun modulus lapisan perkerasan (290.07 ÷ 12,612.39 MPa) relatif sama dengan yang dihasilkan untuk kondisi analisis dasar, kecuali di beberapa titik yang terlihat menyebabkan sebaran data. Hal ini dikarenakan kondisi analisis dasar untuk struktur perkerasan yang sedang dianalisis menghasilkan lendutan konvergen di sekitar lendutan d_{750} .

Untuk target cekung lendutan d_{\max} dan d_{1200} , modulus tanah dasar (104.89 ÷ 856.05 MPa) cenderung lebih besar dibandingkan dengan modulus tanah dasar yang dihasilkan untuk kondisi analisis dasar. Sebaliknya, modulus lapisan perkerasan (251.27 ÷ 12,277.18 MPa) yang dihasilkan untuk target cekung lendutan d_{\max} dan d_{1200} ini cenderung lebih kecil.

Ada dua hal penting yang dapat diringkaskan di sini. Pertama, setiap target cekung lendutan dalam proses *Back Calculation* dapat menghasilkan modulus perkerasan yang berbeda-beda. Jika modulus tanah dasar yang dihasilkan untuk target cekung lendutan tertentu lebih kecil, maka modulus lapisan perkerasan pasti akan lebih besar. Kedua, dengan mengacu pada Gambar 13c, deviasi lendutan total yang dihasilkan dari setiap target cekung lendutan selalu lebih besar dari pada, atau sama dengan, deviasi lendutan total terkecil yang dihasilkan dari program *BackCalc*. Hasil analisis ini mengusulkan, bahwa proses konvergensi antara cekung lendutan teoritis dan cekung lendutan survai sebaiknya dilakukan sampai diperoleh deviasi lendutan total terkecil, bukan terhadap target lendutan tertentu.



Gambar 13. Hasil analisis program *BackCalc* untuk tiga target cekung lendutan

5.4 Pengaruh dari model struktur perkerasan terhadap modulus perkerasan

Empat model struktur perkerasan yang dianalisis di sini adalah seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3, dimana model alternatif II ditetapkan sebagai acuan (kondisi analisis dasar). Pengaruh dari pemodelan struktur perkerasan terhadap modulus perkerasan yang dihasilkan melalui proses *Back Calculation* diperlihatkan pada Gambar 14.

Gambar 14 memperlihatkan bahwa modulus perkerasan yang dihasilkan untuk keempat model alternatif semuanya berbeda. Rentang nilai modulus perkerasan yang dihasilkan tersebut secara singkat disajikan pada Tabel 2. Perbedaan modulus lapisan perkerasan (Gambar 14a) untuk keempat model alternatif terlihat sangat besar, sedangkan perbedaan modulus tanah dasar (Gambar 14b) relatif lebih kecil.

Model alternatif I yang memiliki lapisan perkerasan yang lebih tebal dari pada model alternatif II (kondisi analisis dasar) umumnya menghasilkan, baik modulus tanah dasar, maupun modulus lapisan perkerasan, yang lebih rendah. Sedangkan, model alternatif III dan IV yang memiliki lapisan perkerasan yang lebih tipis umumnya menghasilkan, baik modulus tanah dasar, maupun modulus lapisan perkerasan, yang lebih tinggi.

Perbedaan tebal lapisan perkerasan ternyata sangat mempengaruhi modulus perkerasan yang dihasilkan dari proses *Back Calculation*. Teori analitis^[1] menjelaskan, bahwa untuk modulus tanah dasar, tegangan yang terjadi pada struktur perkerasan yang tipis, seperti halnya pada model alternatif IV, menjadi besar; dan tegangan yang besar untuk menghasilkan modulus tanah dasar yang juga besar. Sedangkan, untuk lapisan perkerasan, teori empirik^[2] menjelaskan, bahwa respon

struktural (cekung lendutan) yang sama dapat dihasilkan dari struktur perkerasan yang memiliki *Structural Number (SN)* yang sama; dan nilai SN yang sama untuk struktur perkerasan yang tipis, seperti halnya pada model alternatif IV, dapat diperoleh dari lapisan perkerasan yang memiliki modulus yang besar.

Hal lain yang juga menarik adalah mengenai deviasi lendutan total yang dihasilkan dari keempat model struktur perkerasan (Gambar 14c). Model alternatif IV, meskipun menghasilkan modulus lapisan perkerasan yang tidak begitu realistis, dapat memberikan deviasi lendutan total yang terkecil. Informasi ini mengindikasikan bahwa model alternatif IV sebenarnya lebih baik dari pada model alternatif II dan struktur perkerasan di jalan tol Jakarta-Cikampek memiliki modulus lapisan perkerasan yang relatif tinggi.

Oleh karena itu, model sistem struktur dua-lapisan dapat dikatakan tidak cocok untuk struktur perkerasan di jalan tol Jakarta-Cikampek. Model sistem struktur 7-lapisan (lihat Gambar 2) seharusnya merupakan model yang paling ideal untuk struktur perkerasan ini. Akan tetapi, proses *back calculation* untuk model sistem struktur 7-lapisan adalah relatif lebih kompleks dan memerlukan waktu pemrosesan komputer yang cukup panjang. Kebutuhan untuk model struktur perkerasan yang kompleks muncul karena pemeliharaan jalan masih sering dilakukan dengan pemberian lapisan tambahan secara berulang tanpa dibarengi dengan kegiatan rekonstruksi. Sebagai kompromi dapat diusulkan model sistem struktur 5-lapisan yang dapat mewakili tanah dasar, lapisan agregat, lapisan dengan bahan stabilisasi (semen, kapur atau aspal), dan dua lapisan permukaan beraspal (lama dan baru). Rada, et.al.^[9] mengungkapkan bahwa model sistem struktur 6-lapisan atau lebih sebenarnya masih dapat dianalisis dengan nyaman asalkan tidak lebih dari 5 modulus lapisan perkerasan yang harus dicari dari

Tabel 2. Hasil analisis program *BackCalc* untuk empat model struktur perkerasan alternatif

No.	Deskripsi	Model Alternatif I	Model Alternatif II	Model Alternatif III	Model Alternatif IV
1	Modulus Tanah Dasar (MPa):				
	Minimum	66.00	76.98	86.56	89.41
	Maksimum	507.89	721.41	720.00	755.27
2	Modulus Lapisan Perkerasan (MPa):				
	Minimum	281.97	290.06	331.96	1,958.81
	Maksimum	4,093.99	12,610.32	20,920.97	423,384.66
3	Deviasi Lendutan Total (%):				
	Minimum	8.97	3.11	3.06	2.19
	Maksimum	35.06	30.38	27.67	22.10
	Rata-rata	20.98	14.85	10.49	6.58

proses *Back Calculation*. Modulus lapisan perkerasan yang lain perlu ditetapkan sebagai data input.

Hasil analisis ini menyatakan, bahwa proses *Back Calculation* hanya bermanfaat secara optimal jika data komposisi dan tebal lapisan perkerasan dapat diukur di lapangan dengan tepat. Oleh karena itu, peralatan survai yang mampu mengukur tebal setiap lapisan perkerasan secara menerus dan non-destruktif, seperti misalnya *Ground Penetrating Radar (GPR)*, harus dipertimbangkan.

Kesalahan dalam pemodelan struktur perkerasan dapat menghasilkan modulus perkerasan yang berbeda-beda. Namun demikian, ketelitian dari modulus perkerasan yang dihasilkan pada akhirnya tetap masih harus dikaji lebih lanjut pada saat modulus perkerasan tersebut akan digunakan dalam proses desain pemeliharaan struktur perkerasan.

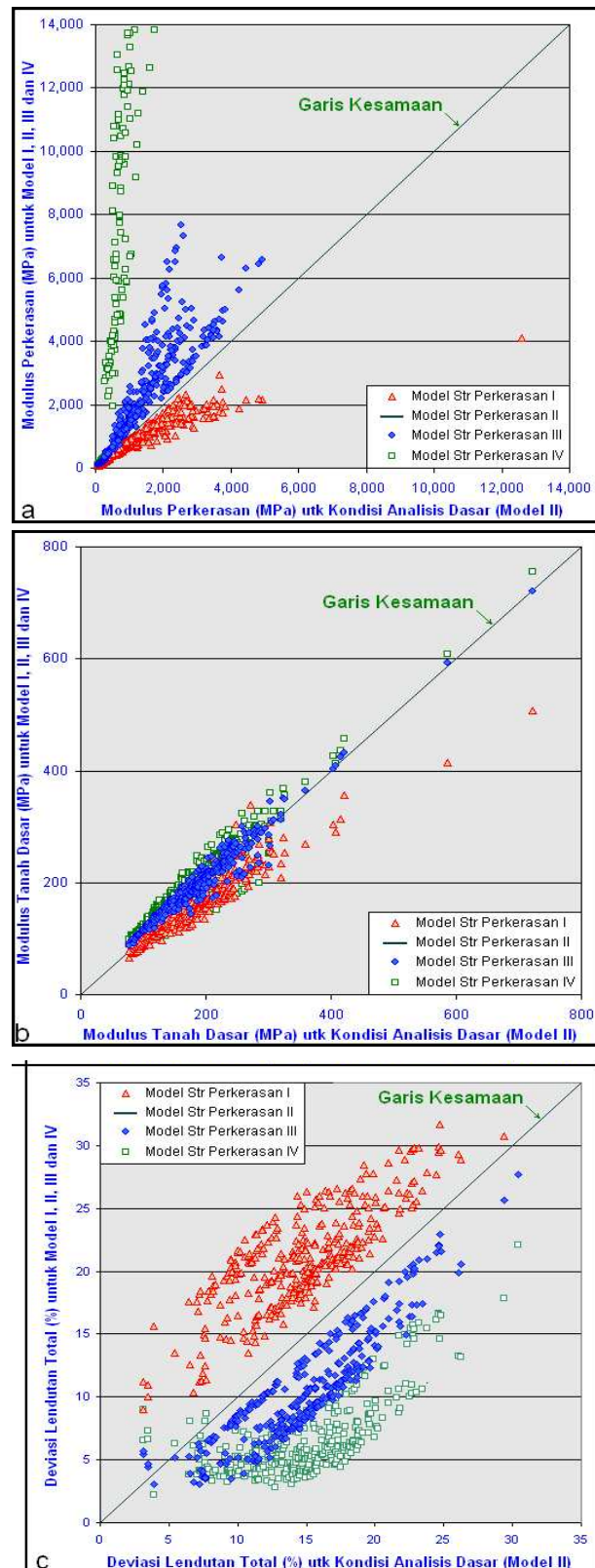
6. Kesimpulan

Dari analisis yang telah dilakukan secara umum dapat ditarik kesimpulan bahwa proses *Back Calculation* pada data lendutan tidak dapat menghasilkan modulus perkerasan yang unik. Keandalan proses *Back Calculation* dipengaruhi oleh konstanta poisson, proses konvergensi dan pemodelan struktur perkerasan.

Konstanta poisson untuk setiap bahan perkerasan yang digunakan harus ditentukan dari hasil pengujian laboratorium; proses konvergensi sebaiknya dilakukan hanya terhadap lendutan maksimum dan deviasi lendutan total terkecil. Algoritma ini terbukti dapat menghasilkan modulus perkerasan yang konsisten; dan pemodelan struktur perkerasan harus didasarkan pada hasil pengukuran komposisi dan tebal lapisan perkerasan langsung di lapangan. Struktur perkerasan yang kompleks yang terdiri dari banyak lapisan sebaiknya perlu dimodelkan minimum sebagai sistem struktur 5-lapisan karena setiap jenis lapisan dapat terwakili, seperti: tanah dasar, lapisan agregat, lapisan dengan bahan stabilisasi (semen, kapur atau aspal), dan dua lapisan permukaan beraspal (lama dan baru).

Khusus untuk model sistem struktur dua-lapisan yang telah dianalisis dalam makalah, pengaruh perubahan konstanta poisson dari 0.3 untuk tanah dasar dan 0.4 untuk lapisan perkerasan keduanya menjadi 0.5 terhadap modulus tanah dasar yang dihasilkan dari proses *Back Calculation* diketahui berkisar antara $-4\% \div -8\%$ dan terhadap modulus lapisan perkerasan antara $-7\% \div -10\%$.

Proses konvergensi yang didasarkan pada deviasi lendutan total terkecil menghasilkan lendutan konver-



Gambar 14. Hasil analisis program *BackCalc* untuk empat model struktur perkerasan alternatif

gen pada d_{max} dan di sekitar lendutan d_{750} . Lendutan d_{750} ternyata untuk struktur perkerasan yang sedang dianalisis umumnya merupakan lendutan titik belok. Disamping itu, lendutan d_{max} diketahui berkorelasi dengan modulus lapisan perkerasan, dan lendutan d_{750} yang dalam hal ini merupakan lendutan titik belok berkorelasi dengan modulus tanah dasar.

Model alternatif II yang menggabungkan lapisan permukaan beraspal dan ATB sebagai lapisan perkerasan di atas gabungan antara lapisan pondasi bawah agregat dan tanah dasar memberikan deviasi lendutan total antara cekung lendutan survai dan cekung lendutan teoritis yang relatif masih tinggi, yaitu sekitar 15%. Analisis lanjutan dengan memodelkan struktur perkerasan ke dalam sistem tiga-lapisan atau lebih masih perlu dilakukan untuk melihat pengaruhnya terhadap deviasi lendutan total yang dihasilkan.

Daftar Pustaka

- AASHTO, 1993, *"Guide for Design of Pavement Structures"*, Washington DC, USA.
- Bina Marga, 1983, *"Manual Pemeriksaan Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman Beam"*, No. 01/MN/B/1983, Jakarta, Indonesia.
- Hossain M dan Scofield LA., 1991, *"Interpretation of Back Calculated Layer Moduli of Crack-and-Seat Pavement from Falling Weight Deflectometer Data"*, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington DC, USA.
- Irwin LH., 1991, *"Report of the Discussion Group on Practical Limitations and What Can Be Done To Overcome Them"*, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington DC, USA.
- Jung FW dan Stolle DFE., 1991, *"Nondestructive Testing with Falling Weight Deflectometer on Whole and Broken Asphalt Concrete Pavements"*, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington DC, USA.
- Kosasih D, Younger JS, Sugeng B dan Sudiono D., 1994, *"Development of a Prototype Analytical Overlay Design Method"*, Proceedings of the 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Kosasih D., 2002, *"Integrasi Mobil Survai Jalan dan Sistem Manajemen Jalan untuk Prediksi Kebutuhan Dana 5-Tahunan Pemeliharaan Jaringan Jalan Kota yang Optimum"*, Laporan Pelaksanaan RUT-IX, Bandung, Indonesia.
- PT. Jasa Marga (Persero), 1994, *"Referensi Program MMS - Volume II: Sistem Referensi Data"*, Jakarta, Indonesia.
- Puslitbang Jalan PU., 1999, *"Laporan Pengujian Lapangan - Jalan Tol Jagorawi dan Jakarta Cikampek"*, Bandung, Indonesia.
- Rada GR, Rabinow SD, Witczak MW dan Richter CA., 1991, *"Strategic Highway Research Program Falling Weight Deflectometer Quality Assurance Software"*, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington DC, USA.
- Rada GR, Rabinow SD, Witczak MW dan Richter CA., 1991, *"Layer Moduli from Deflection Measurements: Software Selection and Development of Strategic Highway Research Program's Procedure for Flexible Pavements"*, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington DC, USA.
- The Asphalt Institute, 1983, *"Computer Program DAMA - User's Manual"*, Maryland, USA.
- Thomson MR., 1991, *"Report of the Discussion Group on Back Calculation Limitations and Future Improvements"*, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington DC, USA.
- Transportation Research Board, 1991, *"Nondestructive Deflection Testing and Back Calculation for Pavements"*, TRR-1377, Proceedings of a Symposium, Washington DC, USA.
- Yoder EJ dan Witczak MW., 1973, *"Principles of Pavement Design"*, John Wiley and Sons, New York, USA.

